心理科学进展 2020, Vol. 28, No. 3, 381–389
Advances in Psychological Science DOI: 10.3724/SP.J.1042.2020.00381

·研究构想(Conceptual Framework)·

中国儿童青少年跨期决策的发展与脑发育机制*

何清华[1,2,3] 李丹丹[1]

([1]西南大学心理学部; [2]认知与人格重点教育部实验室; [3]重庆市脑科学协同创新中心, 重庆 400715)

摘 要 跨期决策是指人们对时间成本与收益进行权衡, 进而做出评价与选择, 其研究主要围绕时间折扣, 是指与当前或近期的损益相比, 人们赋予未来损益更小的权重。虽然有争议, 但 Mischel 等人很早就通过著名的“棉花糖实验”证明了延迟满足能力越强的儿童有着更高的学业成就。延迟满足与跨期决策都是在时间维度上进行的决策。研究者通过脑成像技术发现了成人大脑内支持跨期决策的三个神经网络系统, 但关于儿童的研究鲜有报道。这三大脑网络系统都位于额叶皮层, 该皮层在儿童青少年时期快速发育。通过采用横断研究和纵向研究相结合的实验设计, 对处于跨期决策发展关键期的中国儿童青少年人群进行测查和追踪; 借助神经影像技术, 考察跨期决策发展与脑发育的关系; 整合多模态神经影像技术, 构建可以预测跨期决策能力的脑影像指标。

关键词 跨期选择; 时间折扣; 儿童青少年; 决策; 脑成像

分类号 B844; B849:C91

1 问题提出

决策是指在是两者或者更多选项之间的选择(Buelow, Hupp, Porter, & Coleman, 2018), 具体是指需要对不同选项及其概率进行权衡之后做出决定(何清华, 薛贵, 陈春辉, 董奇, 陈传升, 2014)。决策不仅与我们的生活息息相关, 甚至还影响到国家的发展和政策的制定。决策是大脑的功能, 2016 年, 《科学美国人》杂志 Mind 专版回顾了过去 10 年中最重要的 10 个脑科学研究领域, “决策的脑机制”就名列其中, 与“大脑图谱”、“大脑可塑性”等领域并列。2019 年浙江大学发布的“意识、脑与人工智能”十大科学问题中也将“人类决策的脑处理机制”列入其中。

在所有类型的决策中, 有一类特殊的决策需要对发生在不同时间点——尤其现在与未来间的选项中进行选择, 这一类决策被称为跨期决策(又被称为跨期选择、延迟满足等) (梁竹苑, 刘欢, 2011)。跨期决策需要评估两个维度的奖励相关信息——即金额和时间(Jimura, Chushak, Westbrook, & Braver, 2017)。跨期决策研究主要围绕时间折扣, 是指与当前或近期的损益相比, 人们赋予未来损益更小的权重。虽然有争议, 但 Mischel 等人很早就通过著名的“棉花糖实验”考察了学前儿童延迟满足能力对其未来事业的成功和环境适应能力的影响(Mischel, Shoda, & Rodriguez, 1989), 结果发现拥有较高延迟满足能力的儿童有着更高的学业成就, 更能应对社会压力和挫折, 更善于人际交往, 拥有更好的身材。虽然跨期决策与延迟满足有差别, 但二者都是在时间维度上进行的决策(任天虹, 胡志善, 孙红月, 刘扬, 李纾, 2015)。跨期决策能力不是与生俱来, 而是伴随着大脑的发育不断发展的, 并且在儿童青少年时期呈现出快速增长的趋势(Anandakumar et al., 2018; Blakemore & Robbins, 2012)。目前, 已有研究者采用脑成像技术发现了大脑内支持跨期决策的三个神经网络系统: 价值评估系统、认知控制系统和未来预期系统(Peters & Büchel, 2011)。这三大脑网络系统

收稿日期: 2019-09-04

* 国家自然科学基金(31972906), 重庆市人力资源与社会保障局 2017 年留学人员回国创业创新支持计划(CX2017049)和重庆英才计划(青年拔尖人才, 渝委人才[2019]4 号)。

通信作者: 何清华, E-mail: heqinghua@swu.edu.cn

大都位于额叶皮层，额叶在儿童青少年时期快速发育(Sowell et al., 2003)。

鉴于此，本项目采用横断研究和纵向研究相结合的实验设计，对处于跨期决策发展关键期的中国儿童青少年人群进行跟踪，借助神经影像技术，考察中国儿童青少年跨期决策发展与脑发育的关系；整合多模态神经影像技术，对多模态脑影像信息进行融合，构建可以预测跨期决策能力的脑影像指标。

2 国内外研究现状述评

2.1 跨期决策的影响因素和相关认知理论

跨期决策是指人们通过比较和衡量出现在不同时间点的损益，从而做出选择的过程(梁竹苑，刘欢，2011)。对于获益情境下的跨期决策而言，决策者需要在一个金额较小但可以立即获得的收益选项(Small-Sooner, SS)和一个金额较大但需等待一段时间才能获得的收益选项(Large-Later, LL)之间进行抉择。影响跨期决策的因素可以归纳为三类，分别是决策选项的属性、决策者自身因素和决策的情境因素(Frederick, Loewenstein, & O'donoghue, 2002)，其中最重要的因素就是决策者的个体差异。决策者的个体差异又可以包括基因的差异、年龄的差异、认知能力的差异等等方面。比如，已有研究表明，多巴胺 COMT 和五羟色胺 5-HTTLPR 相关基因多态性会影响到个体的决策能力(He et al., 2010, 2012；何清华等，2014)。为解释跨期决策的本质以及个体为何表现出跨期决策的差异，研究者们从认知加工的角度提出了不同的理论和模型：双系统理论、解释水平理论和质询理论。

首先，决策的双系统(冲动和自我控制)理论认为人们在进行推理和做决策时，冲动和自我控制在同时起作用(刘雷，赵伟华，冯廷勇，2012)。该理论假设有两种控制系统，冷控制系统以海马为基础，依赖于理性，在意识的控制之下推动个体进行一系列认知过程；而热控制系统则受杏仁核的调控，依赖于直觉和个体的情绪唤醒水平(Isen, Sparks, & Iacono, 2014)。冷热两个系统的角逐结果就导致了最终的决定：选择 SS 时热系统占主导地位而选择 LL 时冷系统占主导地位。其次，解释水平理论认为，人们对目标的评价与选择取决于对其的表征，如果目标的发生时间距离个体较远时，人们倾向于采用高解释水平，即采用抽象的、独立于情景的特征来描述；而如果时间距离很近时，人们则倾向于采用低解释水平，即采用具体细节的、依赖于情景的特征来解释(Trope & Liberman, 2010；黄俊，李晔，张宏伟，2015)。高解释水平信息占主导，未来选项的吸引力较大，反之则近期选项的吸引力更大；较远未来的选项随着时间的推移吸引力也相应下降，这也就是出现了时间折扣(Li, Jin, & Guo, 2016)。最后，质询理论认为决策者在面对不同时间不同金额的奖赏时，通常会将这些跨期决策问题分解为一系列小问题来质询自己，例如“我为什么要接受即时收益或接受延迟收益？”等等(Appelt, Hardisty, & Weber, 2011; Weber et al., 2007)。具体来说，质询理论假定询问顺序并生成默认选项；当出现延迟条件时，人们首先质询自己以寻找有利于默认选项的论点(即“关于选择现在 100 元的理由是什么？”)，然后再考虑有利于替代的论点(即“关于选择后来的 110 元的理由是什么？”)。由于干扰，后续的质询检索往往不太顺利，因此最后的结果往往偏向于默认选项(Johnson, Häubl, & Keinan, 2007)。

2.2 跨期决策的计算模型和研究范式

跨期决策与时间折扣密不可分，反映了个体如何看待未来或者过去的损益，延迟折扣率也成为跨期决策能力的有效指标。早期经济学家们基于期望效用理论提出了折扣效用模型，认为决策者对未来不同时间点的效用采用指数函数的形式，以相同的折扣比率 r 进行折扣(Christakou, Brammer, & Rubia, 2011；梁竹苑，刘欢，2011；刘雷 等，2012)。而近期研究者们在此模型基础上提出了双曲线折扣模型和准双曲线折扣模型，主要假设折扣率在不同时间点上是不同的。就当前研究选择较多的双曲线折扣模型而言，该模型的公式为 $V = A / (1 + k D)$，其中 V 代表折扣后的价值，A 代表实际获益的大小，D 代表延迟时间，而 k 则代表延迟折扣率(Christakou et al., 2011；梁竹苑，刘欢，2011；刘雷 等，2012)。其他的一些计算模型还包括次可加模型和“尽可能快”折扣模型。

为了测量跨期决策，研究者们提出了多种研究范式，包括跨期决策任务、直观模拟天平任务和匹配任务等(江程铭，刘洪志，蔡晓红，李纾，2016)。使用最多的跨期决策任务要求被试在两个获得时间和收益大小都不同的选项中进行选择，一个选项为 SS (即时获得的小奖赏)，另一个为

LL (延迟获得的大奖赏)。例如, “你是选择现在得到 100 元还是一周后得到 150 元? ”被试需要完成一系列的这类选择, 每一次选择的选项在立即奖赏金额、延迟奖赏金额和延迟时间中进行改变。一系列的选项可以是固定的(Kuang, Milhorn, Stuppy-Sullivan, Jung, & Yi, 2018), 也可以是自适应的(Luo, Ainslie, Pollini, Giragosian, & Monterosso, 2012; Mahalingam, Palkovics, Kosinski, Cek, & Stillwell, 2016; Wang et al., 2014)。最终根据被试的选择采用双曲线模型拟合被试的延迟折扣率 k, 作为跨期决策能力的指标, k 值越大, 表明折扣越严重, 决策者也更倾向于选择立即奖赏选项, 表现出冲动决策。或者根据实验数据拟合出多个无差别点, 然后计算无差别点与坐标轴所围的曲线下面积(AUC)作为延迟折扣的指标, AUC 与 k 值呈现负相关关系, AUC 越大表明延迟折扣越小, 决策者更倾向于选择延迟奖赏选项。

2.3 跨期决策的神经机制

研究者以多模态神经影像技术考察了跨期决策背后的神经机制。在大脑结构方面, 前额叶−纹状体神经回路灰质体积和白质完整性都与跨期决策有关(付梅, 汪强, 2014)。在大脑功能方面, 首先 McClure 等人提出跨期决策的双系统假说, 并以 fMRI 数据证明了支持跨期决策的两个神经系统的存在: β 系统主要包含边缘多巴胺系统及邻近脑区, 如腹侧纹状体、腹内侧前额叶皮层、内侧眶额皮层和后扣带回; 而 δ 系统则包含外侧前额叶皮层和后顶叶皮层; 这两个系统的相对激活程度决定了被试是否选择延迟奖赏(McClure, Laibson, Loewenstein, & Cohen, 2004)。而 Kable 等人则以 fMRI 数据结果提出单一神经系统假说, 认为跨期决策只依赖于单一的神经表征系统, 包括腹侧纹状体、内侧前额叶皮层和后扣带回皮层(Kable & Glimcher, 2007)。Figner 等人则提出抑制控制理论, 认为背外侧前额叶所发挥的抑制控制能力可能是选择延迟奖赏的神经基础(Figner et al., 2010)。他们采用经颅磁刺激(rTMS)抑制左侧背外侧前额叶皮层的活动, 发现刺激提高了对于立即选项的偏好, 但并不改变对于立即和延迟奖赏的价值评估。随后的研究者根据之前的研究提出了跨期决策的三个神经网络系统模型, 分别为价值评估网络系统、认知控制网络系统和未来预期网络系统(Peters & Büchel, 2011)。

2.4 跨期决策的发展研究

在儿童青少年时期, 跨期决策能力随着年龄的增长不断发展变化的。对儿童青少年的跨期决策能力的关注始于 Mischel 等人的“棉花糖实验” (Mischel et al., 1989)。Mischel 发现那些延迟满足能力强的个体多年后得到更高的父母评价(Mischel, Shoda, & Peake, 1988), 拥有更高的学业成就(Shoda, Mischel, & Peake, 1990)。延迟满足能力强的个体在进行一项抑制控制任务时前额叶皮层表现出更强的激活, 而腹侧纹状皮层表现出更弱的激活(Casey et al., 2011)。除了 Mischel 团队以外, 其他团队也尝试考察跨期决策能力的发展变化情况, 试图找到其发展变化规律。比如, Green 等人率先比较了儿童与成年人和老人在跨期决策上的不同(Green, Fry, & Myerson, 1994), 发现 12 岁儿童组的延迟折扣率显著高于 20 岁的大学生组以及 67 岁的老人组。Steinberg 等人采用多中心横断研究模式, 收集了美国 5 个城市 935 名 10~30 岁个体的跨期决策能力数据(Steinberg et al., 2010), 结果发现 13~16 岁是儿童青少年跨期决策的关键发展时期。de Water 等人研究了 337 名 12~27 岁的被试也发现延迟折扣随着年龄增长不断降低, 15~16 岁是发展最快速的时期(de Water, Cillessen, & Scheres, 2014)。Achterberg 等人采用弥散张量成像(DTI)技术考察了 192 名 8~26 岁被试两年时间范围的跨期决策能力与白质纤维束之间的关系, 结果发现跨期决策能力随着年龄的增长呈现非线性增长趋势, 在青少年晚期/成年初期达到最高水平(Achterberg, Peper, van Duijvenvoorde, Mandl, & Crone, 2016)。在最近, Anandakumar 等人以横断研究和纵向研究相结合的方法, 考察了跨期决策的发展趋势以及与大脑网络系统发育之间的关系(Anandakumar et al., 2018)。研究结果发现无论纵向数据还是横断数据都表明跨期决策能力在 9~14 岁左右有明显的发展趋势, 脑成像数据也表明大脑的价值表征系统和认知控制系统的联结强度可以有效预测跨期决策的发展(Steinberg et al., 2010)。

2.5 与跨期决策神经机制有关的额叶皮层的发育规律

采用脑成像技术, 已有研究者已经总结了大脑内支持跨期决策的三个神经网络系统: 价值评估系统、认知控制系统和未来预期系统(Peters & Büchel, 2011), 三大脑网络系统大都位于前额叶

皮层，或者与前额叶皮层有明显的结构和功能联结。前额叶皮层是人类大脑进化过程中最晚进化的部分，区域占大脑皮质的1/3左右，是多种高级认知活动的中心，包括执行功能(Jurado & Rosselli, 2007; Rollan et al., 2000)；语言和情绪加工(Jurado & Rosselli, 2007)；以及决策能力(Manes et al., 2002)等。前额叶皮层是脑发育中时程最长、成熟时间最晚的一个大脑区域，它的发展对高级认知能力至关重要。在儿童青少年时期，前额叶以及与其相关的高级认知能力发展迅速(Giedd et al., 1999; Sowell et al., 2003)，其主导正常社会情绪和执行功能，主要负责对各项认知活动进行控制和调节(Carlén, 2017)。

脑的大小在6岁已经成长到成人体积的大约90% (Courchesne, Campbell, & Solso, 2011)，而随后的整个儿童期和青春期，大脑发育的特征不是脑大小的增加，而是灰白质结构的变化，具体表现为灰质体积先增加后减少，白质体积持续增加的趋势。并且在这个发育时期，前额叶的发展和扩张几乎是其他区域的两倍(Hill et al., 2010)。一项对4~21岁儿童青少年灰质发育的纵向MRI研究发现，大脑皮质按照从后部到前部的顺序发育，且灰质体积在4~21岁之间呈现非线性增长的趋势(Gogtay et al., 2004)。在额叶中，前中部的灰质发育最早，然后是上部和下部的部分；并且前额叶腹内侧区域通常比背外侧区域更早发育成熟(Fuster, 2002)。而背外侧前额叶的灰质体积从青春期末期开始就逐渐减少，且在青春期和成年早期的灰质体积的减少最明显(Sowell et al., 1999)。与之类似，前额叶中大部分区域的皮层厚度随着年龄呈U型发展趋势(Shaw et al., 2008)，大约在11~12岁时，额叶的灰质体积达到最大值(Giedd et al., 1999)。这些研究表明，额叶的灰白质结构发展遵循与跨期决策相似的非线性规律。

2.6 对现有研究的总结和展望

研究发现影响跨期决策的主要因素有决策内容(延迟时间)、决策情境(如利率)、决策者自身因素(个体差异) (Lempert & Phelps, 2016)。在跨期决策的个体差异中，时间感知能力、人格差异、情绪差异是主要影响因素。有研究表明，高时间洞察力水平的被试，在跨期决策任务中能够调控自己的时间偏好，对选项进行比较权衡，愿意牺牲时间使自己得到的利益最大化，从而选择利益较大的延迟选项；相反，低时间洞察力水平的被试更倾向选择利益较小的近期选项(陶安琪，刘金平，冯廷勇, 2015)。除了时间感知差异外，跨期决策也受到人格差异的影响。与低特质性焦虑个体相比，面对延迟奖赏时，高特质性焦虑个体会高估未来奖赏的潜在风险，更倾向于采取回避策略，偏好近期的较小奖赏选项(Zhao, Cheng, Harris, & Vigo, 2015)。与高自控者相比，低自控者进行跨期决策时更多地选择近期选项(Zhao et al., 2015)。压力、恐惧类负性情绪也会使得个体在跨期选择中更加冲动，更倾向于选择近期选项(余升翔，郑小伟，周劼，杨姗姗, 2016)。但目前决策者自身因素如何影响跨期选择，诸多研究结果仍不一致，还需进一步探索(Lempert & Phelps, 2016)。另外，年龄也是影响个体跨期决策的因素之一，儿童青少年时期是跨期决策发展的关键时期，也是前额叶皮层发育的关键时期，儿童青少年期神经和精神疾病均伴随跨期决策的发展异常。国际上已有研究者尝试找出儿童青少年跨期决策的发展趋势和关键期，而截止目前国内尚鲜有相关报道(蔡晓红，周蕾，李纾，梁竹苑, 2017)，本项目试图采用横断和纵向设计结合从个体差异入手研究影响跨期决策的影响因素以及跨期决策发展的关键期。

3 研究构想

本项目计划采用横断研究和纵向研究相结合的实验设计，对跨期决策发展关键期的中国儿童青少年人群进行跟踪，考察中国儿童青少年跨期决策动态发展规律和构建预测跨期决策能力的脑影像指标。项目的总体设计框架见图1。

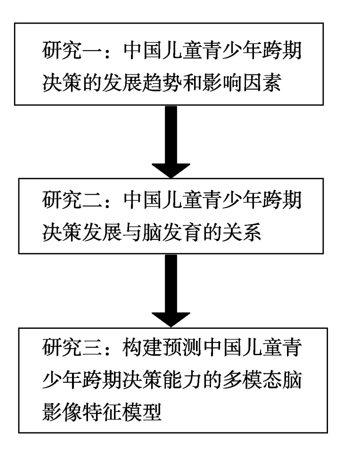


图1 本项目的总体设计框架

3.1　研究 1：中国儿童青少年跨期决策的发展趋势和影响因素

目前在国际上有少量研究证明儿童青少年时期是跨期决策的发展关键期，大多研究表明跨期决策能力随年龄增长呈现出非线性增长的趋势(Achterberg et al., 2016)，而对于人数众多的中国儿童青少年则缺乏相关研究。故本研究将采用横断研究方法，收集行为数据考察跨期决策的发展趋势和影响因素。本研究计划招募在前人研究中证实跨期决策快速发展的年龄段(10~19 岁)的中国儿童青少年 1000 名，并将其分成分为 5 个年龄段：9~10 周岁组、11~12 周岁组、13~14 周岁组、15~16 周岁组、17~18 周岁组，每个年龄段招募 200 名。采用跨期决策任务测查跨期决策能力，并同时测量如性别、控制力等影响因素。

3.2　研究 2：中国儿童青少年跨期决策发展与脑发育的关系

本研究继续沿用横断研究方法，采用脑成像技术，对研究一中部分儿童青少年进行神经影像扫描，考察中国儿童青少年跨期决策发展与脑发育的关系。已有少量研究者开始以静息态脑功能为主要研究手段(Anandakumar et al., 2018)考察脑发育与跨期决策发展的关系，结果发现前额叶-纹状体脑网络在其中具有重要作用。

3.3　研究 3：构建预测中国儿童青少年跨期决策能力的多模态脑影像特征模型

已有研究采用纵向研究方法考察跨期决策的发展趋势，但限于样本量小，结果缺乏证据支撑(Anandakumar et al., 2018)。本研究将采用纵向追踪的研究方法，对研究二中已有脑成像数据的大样本量儿童青少年进行多年的纵向追踪，每年都将测查这些儿童青少年的跨期决策能力，考察哪些多模态神经影像特征可以预测中国儿童青少年跨期决策能力的发展变化趋势，同时尝试进行多模态神经影像信息融合，构建预测跨期决策的多模态神经影像特征模型。

4　理论构建与创新

4.1　理论创新

跨期决策(时间折扣任务)涉及在较小的即时奖励和较大的延迟奖励之间进行选择。时间折扣指的是当奖励的延迟增加时，奖励的主观价值(SV)的减少，其衡量的是对即时奖励的偏好(Green & Myerson, 2004)。跨期决策的纵向研究所得结论并不一致、稳定，延迟折扣在整个生命周期中都有所降低(Green et al., 1994)，但在童年，青春期和成年期延迟折扣与年龄相关的研究结果仅限于少数研究，并且不一致。一些研究显示延迟折扣从儿童时期(6~11 岁)到青春期(12~17 岁)(Demurie, Roeyers, Baeyens, & Sonugabarke, 2012; Prencipe et al., 2011)，或者从青春期到青年期(18~30 岁)线性下降(Olson, Hooper, Collins, & Luciana, 2007; Steinberg et al., 2010)。相比之下，其他人报告了延迟折扣与年龄的非线性相关，与儿童和年轻人相比，青少年的折扣减少(Scheres, de Water, & Mies, 2013)。还有一些纵向研究表明 15~20 岁之间的延迟折扣是稳定的(Audrain-Mcgovern et al., 2009)。跨期决策的发展变化尚未得到一致性以及儿童跨期决策的关键期尚未研究，而本项目有助于为解决这一问题提供实证证据。大多研究表明跨期决策能力随年龄呈现出非线性增长的趋势(Achterberg et al., 2016)，而对于人数众多的中国儿童青少年则缺乏相关研究。故本项目预选取在前人研究中证实跨期决策快速发展的年龄段(10~19 岁)，并采用大样本建立国内最大的中国儿童青少年跨期决策发展数据，并考察中国儿童青少年跨期决策能力是否随年龄呈现出非线性增长趋势。由于大脑额叶皮层在整个青少年期间得到快速发展，支持跨期决策的三个神经网络系统：价值评估系统、认知控制系统和未来预期系统(Peters & Büchel, 2011)，大都位于前额叶皮层，或者与前额叶皮层有明显的结构和功能联结。因此通过剖析大脑额叶皮层的发展在跨期决策的作用，项目研究结果不仅能够揭示影响跨期决策的个体差异因素，还能丰富并完善相关认知理论。核磁研究证据能够帮助研究者深入理解中国儿童青少年跨期决策的发展与脑发育机制的发展变化模式，从而帮助研究者理解跨期决策行为个体差异背后的原因，为决策领域的研究提供了一个新的视角。

4.2　方法创新

从方法的角度，通过项目研究的实施，有望在儿童青少年跨期的发展与脑发育机制的研究上取得以下一些进展：

首先，本项目研究一采用横断研究的方法，选取了在前人研究中证实跨期决策快速发展的年

龄段考察中国儿童青少年跨期决策的发展趋势和影响因素，了解跨期决策能力个体差异背后的原因，有助于建立国内跨期决策发展的标准和确立跨期决策发展的关键期和干预的窗口。

其次，虽然已有研究大多以大学生被试为样本考察跨期决策的神经机制，总结出了支持跨期决策的三大神经网络，也有少量研究者开始以静息态脑功能为主要研究手段考察脑发育与跨期决策发展的关系(Anandakumar et al., 2018)，但是目前国内缺乏相关的研究。本项目尝试建立国内最大的跨期决策相关的脑发育样本库，并考察中国儿童青少年跨期决策发展与脑发育的关系。

最后，本项目将纵向追踪与横断研究结合起来，对已有脑成像数据的儿童青少年进行为期多年的追踪，并收集更多的处于跨期决策发展关键时期的儿童青少年样本，考察哪些多模态神经影像特征可以预测中国儿童青少年跨期决策能力的纵向发展变化趋势，验证横断研究的结果。项目还尝试进行多模态神经影像信息融合，构建预测跨期决策的多模态神经影像特征模型。

综上所述，本项目将用横断研究和纵向研究相结合的实验设计，对跨期决策发展关键期的中国儿童青少年人群进行跟踪，一方面为中国儿童青少年跨期决策动态发展规律提供全面的考察；另一方面借助神经影像技术，考察中国儿童青少年跨期决策发展与脑发育的关系，构建可以预测跨期决策能力的脑影像指标。

参考文献

蔡晓红，周蕾，李纾，梁竹苑. (2017). 中国人跨期决策偏好的毕生发展(“摘要”). *第二十届全国心理学学术会议——心理学与国民心理健康.*

付梅，汪强. (2014). 跨期决策的神经机制:基于体素形态学和弥散张量成像研究的证据. *心理科学进展*, *22*(4), 659–667.

何清华，薛贵，陈春辉，董奇，陈传升. (2014). 遗传因素在风险决策加工中的作用. *心理科学进展*, *22*(2), 191–204.

黄俊，李晔，张宏伟. (2015). 解释水平理论的应用及发展. *心理科学进展*, *23*(1), 110–119.

江程铭，刘洪志，蔡晓红，李纾. (2016). 跨期选择单维占优模型的过程检验. *心理学报*, *48*(1), 59–72.

梁竹苑，刘欢. (2011). 跨期选择的性质探索. *心理科学进展*, *19*(7), 959–966.

刘雷，赵伟华，冯廷勇. (2012). 跨期选择的认知机制与神经基础. *心理科学*, *35*(1), 56–61.

任天虹，胡志善，孙红月，刘扬，李纾. (2015). 选择与坚持：跨期选择与延迟满足之比较. *心理科学进展*, *23*(2), 303–315.

佘升翔，郑小伟，周劼，杨姗姗. (2016). 恐惧降低跨期选择的耐心吗?——来自行为实验的证据. *心理学探新*, *36*(1), 25–30.

陶安琪，刘金平，冯廷勇. (2015). 时间洞察力对跨期选择偏好的预测. *心理科学*, *38*(2), 279–283.

Achterberg, M., Peper, J. S., van Duijvenvoorde, A. C. K., Mandl, R. C. W., & Crone, E. A. (2016). Frontostriatal white matter integrity predicts development of delay of gratification: A longitudinal study. *Journal of Neuroscience*, *36*(6), 1954–1961.

Anandakumar, J., Mills, K. L., Earl, E. A., Irwin, L., Miranda-Dominguez, O., Demeter, D. V., ... Fair, D. A. (2018). Individual differences in functional brain connectivity predict temporal discounting preference in the transition to adolescence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *34*, 101–113.

Appelt, K. C., Hardisty, D. J., & Weber, E. U. (2011). Asymmetric discounting of gains and losses: A query theory account. *Journal of Risk & Uncertainty*, *43*(2), 107–126.

Audrain-Mcgovern, J., Rodriguez, D., Epstein, L. H., Cuevas, J., Rodgers, K., & Wileyto, E. P. (2009). Does delay discounting play an etiological role in smoking or is it a consequence of smoking? *Drug & Alcohol Dependence*, *103*(3), 99–106.

Blakemore, S.-J., & Robbins, T. W. (2012). Decision-making in the adolescent brain. *Nature Neuroscience*, *15*(9), 1184–1191.

Buelow, M. T., Hupp, J. M., Porter, B. L., & Coleman, C. E. (2018). The effect of prosody on decision making: Speech rate influences speed and quality of decisions. *Current Psychology*, 36(4), 833–839.

Casey, B., Somerville, L. H., Gotlib, I. H., Ayduk, O., Franklin, N. T., Askren, M. K., ... Teslovich, T. (2011). Behavioral and neural correlates of delay of gratification 40 years later. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(36), 14998-15003.

Carlén, M. (2017). What constitutes the prefrontal cortex? *Science*, *358*(6362), 478–482.

Christakou, A., Brammer, M., & Rubia, K. (2011). Maturation of limbic corticostriatal activation and connectivity associated with developmental changes in temporal discounting. *Neuroimage*, *54*(2), 1344–1354.

Courchesne, E., Campbell, K., & Solso, S. (2011). Brain growth across the life span in autism: Age-specific changes in anatomical pathology. *Brain Research*, *1380*(12), 138–145.

Demurie, E., Roeyers, H., Baeyens, D., & Sonuga-barke, E. (2012). Temporal discounting of monetary rewards in children and adolescents with ADHD and autism spectrum disorders. *Developmental Science, 15*(6), 791–800.

de Water, E., Cillessen, A. H. N., & Scheres, A. (2014). Distinct age-related differences in temporal discounting and risk taking in adolescents and young adults. *Child Development, 85*(5), 1881–1897.

Figner, B., Knoch, D., Johnson, E. J., Krosch, A. R., Lisanby, S. H., Fehr, E., & Weber, E. U. (2010). Lateral prefrontal cortex and self-control in intertemporal choice. *Nature Neuroscience, 13*(5), 538–539.

Frederick, S., Loewenstein, G., & O'donoghue, T. (2002). Time discounting and time preference: A critical review. *Journal of Economic Literature, 40*(2), 351–401.

Fuster, J. M. (2002). Frontal lobe and cognitive development. *Journal of Neurocytology, 31*(3-5), 373–385.

Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., ... Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: A longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience, 2*(10), 861–863.

Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., ... Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101*(21), 8174–8179.

Green, L., Fry, A. F., & Myerson, J. (1994). Discounting of delayed rewards: A life-span comparison. *Psychological Science, 5*(1), 33–36.

Green, L., & Myerson, J. (2004). A discounting framework for choice with delayed and probabilistic rewards. *Psychological Bulletin, 130*(5), 769–792.

He, Q. H., Xue, G., Chen, C. S., Lu, Z.-L., Chen, C. H., Lei, X. M., ... Bechara, A. (2012). COMT Val158Met polymorphism interacts with stressful life events and parental warmth to influence decision making. *Scientific Reports, 2*(4), 677.

He, Q. H., Xue, G., Chen, C. S., Lu, Z. L., Dong, Q., Lei, X. M., ... Bechara, A. (2010). Serotonin Transporter Gene-Linked Polymorphic Region (5-HTTLPR) Influences Decision Making under Ambiguity and Risk in a Large Chinese Sample. *Neuropharmacology*, *59*(6), 518–526.

Hill, J., Inder, T., Neil, J., Dierker, D., Harwell, J., & Essen, D. V. (2010). Similar patterns of cortical expansion during human development and evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107*(29), 13135–13140.

Isen, J. D., Sparks, J. C., & Iacono, W. G. (2014). Predictive validity of delay discounting behavior in adolescence: A longitudinal twin study. *Experimental and Clinical Psychopharmacology, 22*(5), 434–443.

Jimura, K., Chushak, M. S., Westbrook, A., & Braver, T. S. (2017). Intertemporal decision-making involves prefrontal control mechanisms associated with working memory. *Cerebral Cortex, 28*(4), 1105–1116.

Johnson, E. J., Häubl, G., & Keinan, A. (2007). Aspects of endowment: A query theory of value construction. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 33*(3), 461–474.

Jurado, M. B., & Rosselli, M. (2007). The elusive nature of executive functions: A review of our current understanding. *Neuropsychology Review, 17*(3), 213–233.

Kable, J. W., & Glimcher, P. W. (2007). The neural correlates of subjective value during intertemporal choice. *Nature Neuroscience, 10*(12), 1625–1633.

Kuang, J., Milhorn, H., Stuppy-Sullivan, A., Jung, S., & Yi, R. (2018). Alternate versions of a fixed-choice, delay-discounting assessment for repeated-measures designs. *Experimental & Clinical Psychopharmacology*, *26*(5), 503–508.

Lempert, K. M., & Phelps, E. A. (2016). The malleability of intertemporal choice. *Trends in Cognitive Sciences, 20*(1), 64–74.

Li, H. X., Jin, S. H., & Guo, Y. F. (2016). How do construal levels affect the intertemporal choices of internet addicts? *Computers in Human Behavior, 60*, 173–178.

Luo, S., Ainslie, G., Pollini, D., Giragosian, L., & Monterosso, J. R. (2012). Moderators of the association between brain activation and farsighted choice. *Neuroimage, 59*(2), 1469–1477.

Mahalingam, V., Palkovics, M., Kosinski, M., Cek, I., & Stillwell, D. (2016). A Computer adaptive measure of delay discounting. *Assessment*, *25*(8), 1036–1055.

Manes, F., Sahakian, B., Clark, L., Rogers, R., Antoun, N., Aitken, M., & Robbins, T. (2002). Decision-making processes following damage to the prefrontal cortex. *Brain, 125*(3), 624–639.

McClure, S. M., Laibson, D. I., Loewenstein, G., & Cohen, J. D. (2004). Separate neural systems value immediate and delayed monetary rewards. *Science, 306*(5659), 503–507.

Mischel, W., Shoda, Y., & Peake, P. K. (1988). The nature of adolescent competencies predicted by preschool delay of gratification. *Journal of Personality and Social Psychology, 54*(4), 687–696.

Mischel, W., Shoda, Y., & Rodriguez, M. L. (1989). Delay of gratification in children. *Science, 244*(4907), 933–938.

Olson, E. A., Hooper, C. J., Collins, P., & Luciana, M. (2007). Adolescents' performance on delay and probability

discounting tasks: Contributions of age, intelligence, executive functioning, and self-reported externalizing behavior. *Personality & Individual Differences, 43*(7), 1886–1897.

Peters, J., & Büchel, C. (2011). The neural mechanisms of inter-temporal decision-making: Understanding variability. *Trends in Cognitiveences, 15*(5), 227–239.

Prencipe, A., Kesek, A., Cohen, J., Lamm, C., Lewis, M. D., & Zelazo, P. D. (2011). Development of hot and cool executive function during the transition to adolescence. *Journal of Experimental Child Psychology, 108*(3), 621–637.

Rollan, A., Giancaspero, R., Fuster, F., Acevedo, C., Figueroa, C., Hola, K., ... Duarte, I. (2000). The long-term reinfection rate and the course of duodenal ulcer disease after eradication of Helicobacter pylori in a developing country. *The American Journal of Gastroenterology, 95*(1), 50–56.

Scheres, A., de Water, E., & Mies, G. W. (2013). The neural correlates of temporal reward discounting. *Wiley Interdisciplinary Reviews Cognitive Science, 4*(5), 523–545.

Shaw, P., Kabani, N. J., Lerch, J. P., Eckstrand, K., Lenroot, R., Gogtay, N., ... Wise, S. P. (2008). Neurodevelopmental trajectories of the human cerebral cortex. *Journal of Neuroscience, 28*(14), 3586–3594.

Shoda, Y., Mischel, W., & Peake, P. K. (1990). Predicting adolescent cognitive and self-regulatory competencies from preschool delay of gratification: Identifying diagnostic conditions. *Developmental Psychology, 26*(6), 978–986.

Sowell, E. R., Peterson, B. S., Thompson, P. M., Welcome, S. E., Henkenius, A. L., & Toga, A. W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nature Neuroscience, 6*(3), 309–315.

Sowell, E. R., Thompson, P. M., Holmes, C. J., Batth, R., Jernigan, T. L., & Toga, A. W. (1999). Localizing age-related changes in brain structure between childhood and adolescence using statistical parametric mapping. *Neuroimage, 9*(6), 587–597.

Steinberg, L., Graham, S., O'Brien, L., Woolard, J., Cauffman, E., & Banich, M. (2010). Age differences in future orientation and delay discounting. *Child Development, 80*(1), 28–44.

Trope, Y., & Liberman, N. (2010). Construal-Level theory of psychological distance. *Psychological Review, 117*(2), 440–463.

Wang, Q., Luo, S., Monterosso, J., Zhang, J. T., Fang, X. Y., Dong, Q., & Xue, G. (2014). Distributed value representation in the medial prefrontal cortex during Intertemporal Choices. *Journal of Neuroscience, 34*(22), 7522–7530.

Weber, E. U., Johnson, E. J., Milch, K. F., Chang, H., Brodscholl, J. C., & Goldstein, D. G. (2007). Asymmetric discounting in intertemporal choice: A query-theory account. *Psychological Science, 18*(6), 516–523.

Zhao, J. L., Cheng, J. Q., Harris, M., & Vigo, R. (2015). Anxiety and intertemporal decision making: The effect of the behavioral inhibition system and the moderation effects of trait anxiety on both state anxiety and socioeconomic status. *Personality & Individual Differences, 87*, 236–241.

Brain maturation and improvement in intertemporal choice in Chinese children and adolescents

HE Qinghua[1,2,3]; LI Dandan[1]

([1] *Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*)

([2] *Key Laboratory of Cognition and Personality, Ministry of Education, Chongqing* 400715, *China*)

([3] *Chongqing Collaborative Innovation Center for Brain Science, Chongqing* 400715, *China*)

Abstract: Intertemporal decision-making refers to the phenomena that people always give less weight to future gains and losses than recent gains and losses. Although controversial, Mischel and colleagues had demonstrated that children with higher delay gratification ability had higher academic achievement later in life through the famous “Marshmallow Experiment”. Both delay gratification and inter-temporal choice deal with the decision-making behavior over time. Previous studies had discovered three neural network systems that support intertemporal decision making in the adult brain, but few evidences had been reported in children. These brain network systems were mainly located in the frontal cortex, which developed rapidly in children and adolescents. The current study aimed to provide a comprehensive survey for understanding the dynamic development of inter-temporal decision-making in children and adolescents in mainland China

within the critical period of the inter-temporal decision-making by cross-sectional and longitudinal designs. Neuroimaging data will also be collected to examine the relationship between intertemporal decision-making development and brain mutation, with a special focus on the prefrontal-striatum neural network. Finally, a model with multimodal neuroimaging and behavioral fusion would be proposed to predict the inter-temporal decision-making ability. These evidences would provide services for parents, schools, as well as the society to cultivate and improve the intertemporal decision-making ability in children and adolescents.

Key words: inter-temporal choice; temporal discount; children and adolescents; decision making; brain imaging

作者简介：何清华，西南大学心理学部教授、博士生导师，中国心理学会决策心理学专业委员会委员，中国心理学会经济心理学专业委员会副主任，主要从事决策神经科学研究。